

三峡库区消落带芦苇穗期光合生理特性研究

冯大兰¹ 刘芸¹ 黄建国¹ 杨娟² 马菲¹ 谢君¹

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400716; 2. 西南大学农学与生物科技学院, 重庆 400716)

摘要:三峡水库运行时,在库区两岸将形成周期性变化的水陆交错地带即消落区,它是陆地和水生生态系统的交错地带,具有生态脆弱性、生物多样性、水分变化周期性和人类活动的频繁性等特点,它对水、陆生态系统具有重要影响。同时,它也面临着严峻的生态与环境问题。以嘉陵江岸边的常见芦苇 *Phragmites communis* (reed)为研究对象,模拟三峡库区消落带土壤含水量变化特征,设置了 T1(淹水超过土壤表面 2 cm)、T2(土壤含水量为田间持水量的 70%—100%)、T3(土壤含水量为田间持水量的 40%—60%) 3 个不同处理组,用嘉陵江江水灌溉芦苇,研究三峡库区不同消落带带位土壤不同含水量条件下芦苇穗期的光合生理生态响应机理,为消落带植被恢复重建和生态环境保护提供理论依据。实验结果表明:土壤不同含水量显著影响了芦苇穗期的叶片水分含量、表观光量子效率(AQY)、暗呼吸速率(R_d)和光补偿点(LCP),而最大净光合速率(A_{max})和光饱和点(LSP)没有受到显著影响。T1、T2和 T3的最大净光合速率 A_{max} 值分别为 17.63、19.13和 20.97 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。T3的表观光量子效率 AQY值为 0.055 $\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol photons}$,且明显 ($P < 0.05$)高于 T1(0.042 $\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol photons}$)和 T2(0.046 $\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol photons}$)。这表明 T3条件下芦苇的光能转化率高,光合能力强,并且 T3的水分利用效率(WUE)和光量子利用效率(QUE)最高,自由水/束缚水比值最小,说明芦苇具有较强的抗干旱的能力。光补偿点 LCP中 T2的值为 35.43 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,该值明显地 ($P < 0.05$)高于 T1(14.55 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)和 T3(12.79 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)。T1、T2和 T3的光饱和点 LSP分别为 912.5、803.89和 897.22 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,表明 T1条件下芦苇对光的利用范围较宽,并且 T1的 C_i 值最大,光合作用的源物质多, R_d 值最小,暗呼吸所消耗的底物少。与其他耐水淹植物相比,T1条件下芦苇具有较高的 A_{max} (17.63 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$),说明芦苇具有较强的耐水淹能力。因此,研究表明芦苇不仅具有耐水湿的特点,还具有耐旱性,芦苇可以作为三峡库区消落带植被恢复重建和生态环境保护的禾本科先锋物种。

关键词:三峡库区;消落带;芦苇;穗期;土壤含水量;光合生理特征

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2009)05-0866-08

三峡库区消落带是指因三峡水库运行期间水文调度引起的库区水位变化,在库区流域两岸周边形成的一段特殊生态环境区域,是库区泥沙、有机物、化肥和农药进入水库的最后一道屏障,是水陆生态系统的交错地带。它在生态系统的稳定、抗外界干扰能力、对生态环境变化的敏感性及生态环境改变速率上,均表现出明显的脆弱特性。长江三峡工程在库区 145—175 m 高程范围内形成的沿岸消落带长度就达 2000 km 以上,面积达 298 km^2 。三峡库区消落带汛期为每年的 6 月至 9 月,水库维持在 145 m 低水位运行;汛末 10 月份,水库蓄水,水位逐步升高至 175 cm,因此 12 月份至次年 4 月份水库维持在

较高水位。水位周期性常年变化使得消落带土壤含水量呈现出从干旱状态到全水淹状态的一系列梯度性变化^[1-3]。因此,如何治理好三峡库区消落带,是一个极其重要的生态环境问题。

水生植物构成的水陆交错带对陆源营养物质具有截流作用。芦苇 *Phragmites communis* (reed)是一种多年生禾本科挺水植物,常见于三峡库区江(河)及其支流江岸消落带,其生长期是每年的 4 至 11 月,具有净化污水、调节气候、防止水土流失、改良土壤、维持生物多样性等生态功能^[4]。尹澄清等^[5]在白洋淀进行的野外试验表明:白洋淀湖周水陆交错带中芦苇群落和群落间的小沟都能有效地截流陆源

收稿日期: 2008-01-07; 修订日期: 2008-12-01

基金项目: 三峡库区生态环境教育部重点实验室自由探索研究基金项目资助(2007); 重庆市自然科学基金资助(CSTC, 2007BB7376); 教育部留学回国人员启动基金(2007)资助

作者简介: 冯大兰(1976—), 女, 汉族, 重庆双桥人; 在读博士; 主要从事土壤环境、植物营养及生理生态研究。E-mail: Fengdalang@163.com

通讯作者: 刘芸, E-mail: liuyun19970205@163.com; Tel: 023-68250622

营养物质; House C H, et al.^[6]表明, 芦苇对 N、P 的吸收能力很强, 比藻类具有更强的吸磷能力。然而库区消落带人为活动频繁, 加上不合理的土地开发利用, 严重影响了库区岸边的芦苇群落, 芦苇的去污截流作用没有得到发挥, 而库区水质的潜在富营养化趋势已经出现^[7,8]。因此, 三峡库区消落带植被恢复建设和生态环境保护的物种选择已迫在眉睫。本研究以库区支流嘉陵江边生长的芦苇为实验材料, 研究芦苇在其生长发育过程中如何响应消落带土壤不同含水量变化的生理生态特性, 以揭示芦苇对土壤水分变化的反应和适应机理, 以期为三峡库区消落带治理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究材料 在长江的重要支流嘉陵江江岸选取芦苇一年生根状茎分蘖芽若干作为研究对象。将生长基本一致的根状茎分蘖芽混栽入若干塑料桶(内径为 53 cm, 高 63 cm)中, 每桶 50 株。盆内土层厚度 45 cm, 土壤取自嘉陵江边 135—155m 水位。将所有实验植株置于西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室生态实验基地(大棚实验地)内培养, 实验从 2006 年 4 月 3 日始至 11 月 10 日止, 整个实验过程均用嘉陵江江水灌溉(根据 2006 年重庆市水资源公报和地下水水环境质量标准 GB3838-2002: 水中溶解氧 ≥ 5 mg/L、COD 为 20 mg/L、BOD₅ 为 4 mg/L)。当芦苇幼苗长至第三片叶完全展开时, 选择长势基本一致的 9 桶芦苇苗作为实验材料。芦苇从 4 月初开始萌芽生长, 7、8 月份是芦苇营养生长最旺盛的时期, 9 月初芦苇开始抽穗一直持续到 11 月初, 然后, 植株叶片开始衰老变黄枯萎。

1.2 实验方法 为模拟消落带土壤含水量的变化, 将实验用苗分成 3 组, 每组 3 桶, 分别设为 T1(淹水超过土壤表面 2 cm)、T2(土壤含水量为田间持水量的 70%—100%)、T3(土壤含水量为田间持水量的 40%—60%)。T1 组在本实验中为植株根基部土壤全部淹没, 淹水超过土壤表面 2 cm, 当桶内水面低于淹没土壤 2 cm 时, 即开始补水至超过土壤表面 2 cm^[9]。T2 组土壤含水量为田间持水量的 70%—100% (土壤含水量采用称质量法测定), 早上 6 时至晚上 20 时期间每隔 2h 检查一次土壤水分情况, 如发现土壤表面低于 70% 即开始补水。T3 组土壤含水量为田间持水量的 40%—60%, 植株心叶在晴天 13 时左右出现萎

蔫, 17 时左右恢复正常^[10—12]。由此形成不同梯度的土壤含水量。

1.3 气体交换参数测定 2006 年 10 月上旬, 芦苇已齐穗, 利用 LI-6400 光合分析仪 (LI-COR, Inc, USA) 在植株第二片完全展开叶的中部进行测定(此时的叶片尚未下披)。测定时间在上午 9:00—11:00 进行, 重复 3 次。测定光合光响应曲线时, 空气温度为 (30 ± 1) , 湿度为 68%, 通过 LI-6400 CO₂ 钢瓶控制 CO₂ 的摩尔分数为 (380 ± 0.1) $\mu\text{mol/mol}$, 气体流速控制为 0.5 L/min, 温度控制在 25, 相对湿度为 60%, 采用红蓝 LED 作为光源, 设定光合强度梯度为 0、50、100、150、200、500、800、1000、1200 $\mu\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$ 。对 P_n -PAR 的曲线在 0—200 $\mu\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$ PAR 范围内的数据进行直线回归, 求得该响应曲线的初始斜率 $dP_n/dPAR$ 为表观量子效率 (AQY, apparent quantum yield), P_n 为 0 时的 PAR 值为光补偿点 (LCP), PAR 为 0 时的 P_n 值为暗呼吸 (R_d), P_n 最大时的 A_{max} 为光饱和时的光合能力, 同时计算水分利用效率 (WUE) 和光量子利用效率 (QUE)。光合测定前, 先用饱和光对植物叶片进行 30 min 光诱导。

1.4 植物叶片自由水和束缚水测定 采用折射仪^[13]法测定芦苇穗期叶片组织含水量、自由水和束缚水含量, 每种处理测定三株, 每株测定三片叶, 此三片叶用于光合测定, 测定时间在上午 8:00 采样进行。

1.5 统计分析 利用统计分析软件 spss13.0 和 Excel 进行实验数据分析处理和作图。土壤不同含水量对芦苇穗期光合生理特性影响采用单因素方差分析 (one-way ANOVA)。用 Duncan 多重比较 (Duncan's multiple range test) 检验土壤不同含水量芦苇穗期叶片组织含水量、自由水和束缚水含量、表观量子效率、最大光合能力、水分利用效率、光量子利用效率和暗呼吸的差异显著性。

2 结果

2.1 外界环境因子变化

植物光合作用受各种环境因素的影响, 而这些环境因素时刻都在发生变化, 使光合作用呈现出复杂的变化。从图 1 可知: 外界的光照强度 (PAR) 和温度 (T_a) 的年变化为先升后降的单峰曲线, PAR 在 7 月份达到高峰, 而 T_a 在 8 月份达到高峰。空气相对湿度 (RH) 的年变化呈先降后升的单峰曲线, 在 7 月份达到最低值。

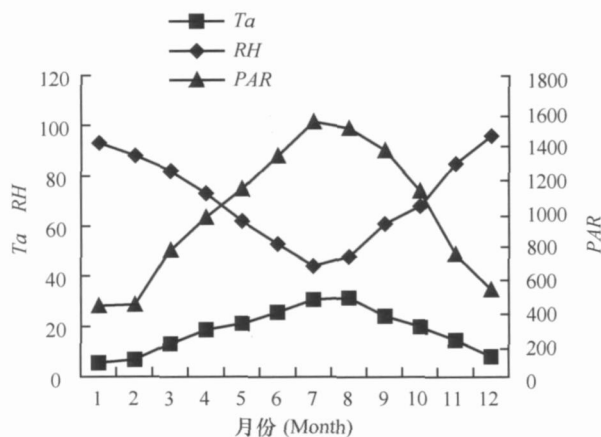


图 1 外界环境因子年变化

Fig. 1 The annual changes of environmental factors

光合有效辐射 (PAR)、空气相对湿度 (RH)、空气温度 (Ta)

Photosynthetic available radiation (PAR), Air relative humidity (RH), Air temperature (Ta)

2.2 土壤不同含水量的芦苇穗期叶片含水量变化

从表 1 可知:土壤不同含水量显著影响穗期芦苇叶片的水分含量, T1 组织含水量最高, 与 T2 和 T3 之间存在显著差异, 而 T2 与 T3 之间差异不显著; T1、T2 和 T3 之间的自由水和束缚水含量均存在显著差异, 其中 T1 自由水含量最高, T3 的束缚水含量最高。

表 1 土壤不同含水量对芦苇穗期叶片水分含量影响的方差分析

Tab. 1 Analysis of variance of the effects of different soil moisture content on the leaf water content of heading stage in *Phragmites communis* (reed)

参量 Parameters	T1	T2	T3
组织含水量 The content of cell water (%)	4.43 ^a	59.26 ^b	58.30 ^b
自由水含量 The content of free water (%)	52.44 ^a	41.26 ^b	28.83 ^c
束缚水含量 The content of bound water (%)	11.99 ^a	18.02 ^b	29.47 ^c
自由水/束缚水 Free water ratio to bound water	4.55 ^a	2.31 ^b	0.99 ^c

注:表中 a、b 和 c 表示 $P=0.05$ 水平差异显著性。

Note: a, b and c refer to different significance levels at 0.05 level

2.3 土壤不同含水量的芦苇穗期光合生理参数随光合有效辐射 (PAR) 的变化

芦苇穗期的净光合速率 P_n 和气孔导度 G_s 随 PAR 的增加呈上升趋势 (图 2A、2C), 在 PAR 0—200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 之间, 增幅最大, P_n 值的大小为 $T_3 > T_1 > T_2$, 而 G_s 值的大小为 $T_1 > T_3 > T_2$, 当 PAR 增加到 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 时, T1 和 T3 的 P_n 和 G_s 均

继续呈增长趋势, 而 T2 的 P_n 和 G_s 则开始下降; 在 PAR 500—1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 之间, P_n 和 G_s 值的大小为 $T_3 > T_2 > T_1$ 。

从图 2B 可知:芦苇穗期的蒸腾速率 T_r 随 PAR 的增加而增强, 在 PAR 0—200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 之间, 处理之间差异不明显; 当 PAR 继续增加到 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 时, T1 和 T3 的 T_r 仍在增强, 而 T2 的则呈下降趋势; 在 PAR 500—1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 之间, T_r 值的大小为 $T_2 > T_3 > T_1$ 。

芦苇穗期的胞间 CO_2 浓度 C_i 随 PAR 的增加而减小, 在 PAR 0—200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 之间, 随 PAR 的增加迅速变小, 处理之间无显著差异; 当 PAR 继续增加到 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 时, T2 继续减小, 而 T1 和 T3 略升高; 在 PAR 500—1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 之间, C_i 值的大小 $T_1 > T_3 > T_2$ (图 2D)。

从图 2E 可见:芦苇穗期的水分利用效率 WUE 随 PAR 的增加先升后降, 在 PAR 0—200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 之间, 升幅最大, 其中尤以 T3 的 WUE 值最大, 当 PAR 继续增加到 800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 时, T1、T2 和 T3 的 WUE 均达到最大值, 随后开始下降; 在 PAR 500—1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 之间, WUE 值的大小为 $T_3 > T_1 > T_2$ 。

芦苇穗期的光量子利用效率 QUE 随 PAR 的增加先升后降, 在 PAR 0—200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 之间, QUE 大小为 $T_3 > T_1 > T_2$; 在 PAR 为 500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 时, T2 和 T3 的 QUE 开始下降; 在 PAR 为 800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 时, T1 的 QUE 开始下降; 在 PAR 500—1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 之间, QUE 的大小为 $T_3 > T_2 > T_1$ (图 2F)。

2.4 土壤不同含水量的芦苇穗期光合作用光响应特征参数变化

从表 2 可知: T1、T2 和 T3 的表观量子效率 AQY 值分别为 0.042、0.046 和 0.055 $\mu\text{mol CO}_2 / \mu\text{mol Photons}$, T3 与 T1 和 T2 之间存在显著差异; 光补偿点 LCP 中 T2 的值为 35.43 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, 该值明显地 ($P < 0.05$) 高于 T1 (14.55 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) 和 T3 (12.79 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$); 最大净光合速率即光合能力表现为 $T_3 > T_2 > T_1$, 处理之间差异不显著。暗呼吸速率 R_d 中 T1 最小, 与 T2 有显著差异, 而与 T3 差异不显著, T2 与 T3 有显著差异。T1 的光饱和点 LSP 高于 T3 和 T2, 处理之间无显著差异。

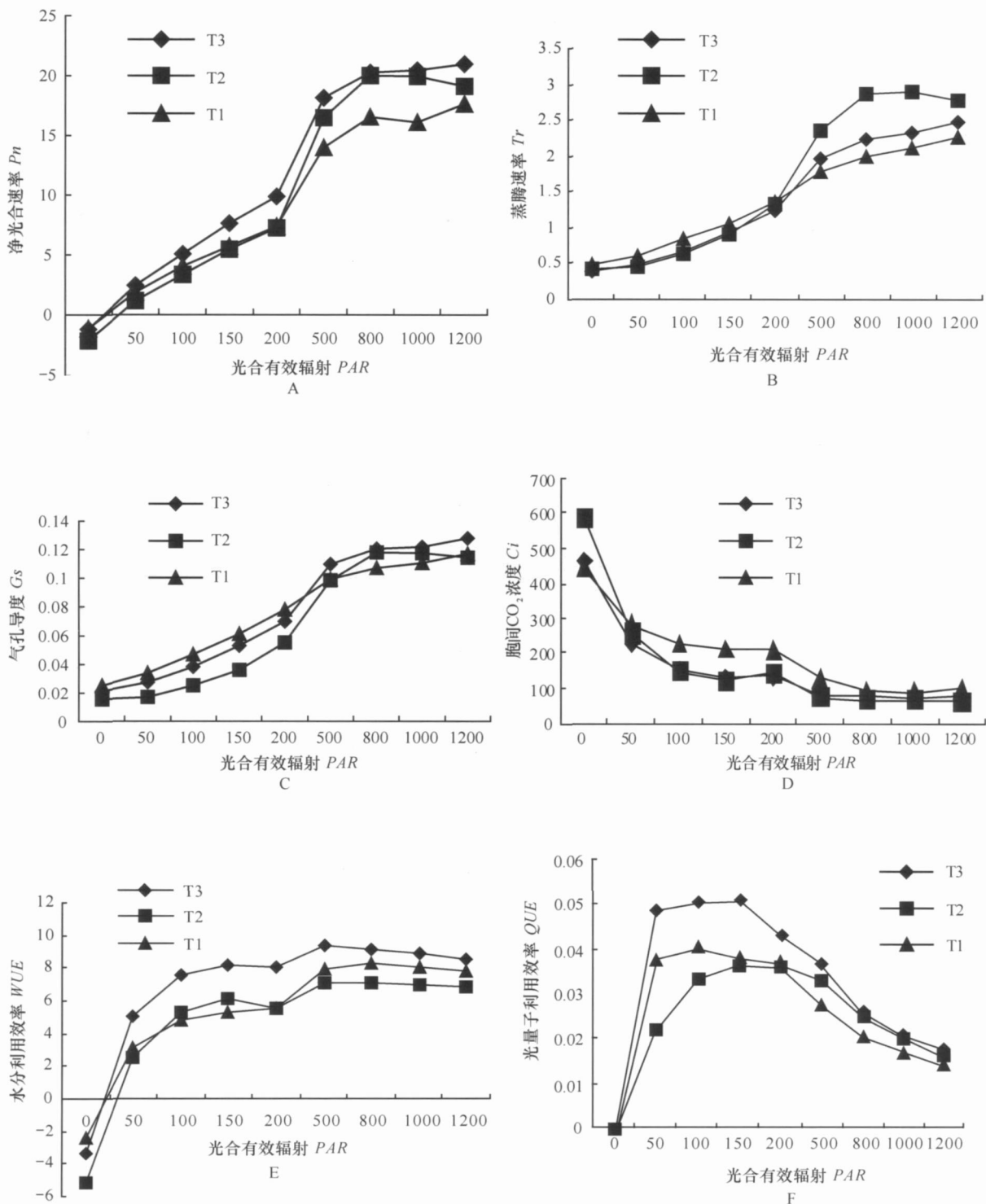


图 2 土壤不同含水量芦苇穗期光合参数对不同光合有效辐射 (PAR) 的响应

Fig. 2 The photosynthetic parameters to the photosynthetically active radiation (PAR) of the *Phragmites communis* (reed) under different soil moisture content

净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (Tr)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、水分利用效率 (WUE) 和光量子利用效率 (QUE)

net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (Tr), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i), water use efficiency (WUE) and light quantum use efficiency (QUE)

表 2 土壤不同含水量芦苇穗期光合—光响应特征参数值

Tab. 2 Characteristic parameters of the light response curves on heading stage of *Phragmites communis* (reed) under different soil moisture content

特征参数 Characteristic parameters	T1	T2	T3
光饱和点 LSP, light saturation point for P_n ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	912.5	803.89	897.22
光补偿点 LCP, light compensation point for P_n ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	14.55 ^b	35.13 ^a	12.79 ^b
表观量子效率 AQY, apparent quantum yield ($\mu\text{mol CO}_2 / \mu\text{mol Photons}$)	0.042 ^b	0.046 ^b	0.055 ^a
光合能力 A_{max} , photosynthetic capability ($\mu\text{mol CO}_2 / \text{m}^2 \cdot \text{s}$)	17.63	19.13	20.97
暗呼吸速率 R_d , Dark respiration rate ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	0.52 ^b	1.62 ^a	0.71 ^b

注:表中 a, b, c 表示 $P = 0.05$ 水平差异

Note: a, b and c refer to different significance levels at 0.05 level

3 讨论

3.1 土壤不同含水量的芦苇穗期生理参数

在三峡库区消落带环境条件下,当处于较少的水分环境时(如 T3 组所设定的环境条件),芦苇叶片的自由水含水量最低,自由水/束缚水比值也最小。有研究证明自由水及自由水/束缚水的比值与植物物质代谢能力强弱和抗逆境能力强弱密切相关^[14]。因此,本实验表明 T3 组芦苇具有较强的耐干旱能力。

在干旱条件下,植物净光合速率的变化可以作为重要的评价指标之一来衡量植物抗干旱性的大小^[15]。光合作用是植物生长的重要决定因素,植物叶片对环境的光合响应提供了植物在不同光条件下生存和生长的能力以及对不断变化的环境条件适应能力的信息^[16,17]。土壤不同含水量芦苇穗期的净光合速率 P_n 的大小为 $T3 > T1 > T2$,且 T3 的水分利用效率和光量子利用效率最高。张淑勇^[18]研究表明:维持爬山虎叶片具有高的光合速率和水分利用效率的适宜土壤水分范围为相对含水量 45.2%—65.7%,爬山虎具有较强的抗旱能力,与本实验中 T3 条件下表现出高的光合速率和水分利用效率一致。也有研究^[19,20]表明,土壤水分是植物光合速率的主要限制因子,但轻度的水分亏缺并不影响叶片气孔开放,因而对 P_n 不会产生明显的影响。本实验中,在高光强条件下,与 T1 和 T2 比较, T3 具有较低的 T_r 和较高的 P_n 和 WUE ,说明芦苇具有较强的抗干旱的能力。

在水淹条件下,植物保持较高的光合速率和正

常的光合特性是植物能耐受水淹的重要原因之一^[21]。T1、T2 和 T3 的最大净光合速率 A_{max} 值分别为 17.63、19.13 和 20.97 $\mu\text{mol CO}_2 / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。罗芳丽等^[22]通过对野古草耐水淹能力研究及其与其他耐水淹植物比较,发现野古草水淹 60d 后,半淹、水下 0.5m 和水下 2m 植株的净光合速率分别为 14.5、7.51 和 9.15 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,认为野古草与一些耐淹物种相比其光合能力受水淹影响较小,本实验在 PAR 为 1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 条件下, T1 (处理 90d 后)较野古草半淹 60d 的光合效率高出 21.6%; T1 的 C_i 值最大,而 R_d 最小,说明 T1 条件下光合作用的源物质丰富,光合速率提高的潜力大^[23],暗呼吸消耗的产物少,表明在三峡库区消落带高光强条件下 T1 组芦苇仍保持较高的光合效率,具有较强的耐水淹能力。

3.2 土壤不同含水量的芦苇穗期光合作用光响应特征参数

光饱和点和光补偿点分别代表光照强度与光合作用关系的上限和下限临界指标,能够反映植物叶片对弱光和强光的利用能力^[24]。T1、T2 和 T3 的光补偿点 (LCP) 分别为 14.55、35.13 和 12.79 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,较典型阳性植物光补偿点 (20—40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) 低^[25]。T1、T2 和 T3 的光饱和点 (LSP) 分别为 912.5、803.89 和 897.22 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,可见 T1 和 T3 组芦苇利用光的幅度范围增大,对光环境变化适应能力更强,在三峡库区消落带土壤含水量梯度变化条件下也能很好的生存和生长。

表观量子效率 AQY 是光合作用中光能转化效率的指标之一^[26]。T1、T2 和 T3 的 AQY 值分别为 0.042、0.046 和 0.055 $\mu\text{mol CO}_2 / \mu\text{mol Photons}$,这一结果与丘国雄^[27]报道的 C_3 植物取值范围 (约 0.055) 和蹇洪英等^[28—30]报道的自然条件下一般植物的表观量子产额 (0.03—0.06) 基本一致。AQY 与光饱和时的 A_{max} 存在显著的正相关^[31],与本实验结果一致 (AQY 和 A_{max} 变化趋势均为 $T3 > T2 > T1$) (表 2)。本实验条件下,相对 T1 和 T2, T3 条件下芦苇的光能转化效率高、光合能力强,说明与耐水淹比较,芦苇更具耐旱性。有研究表明在一定环境条件下,叶片的 A_{max} 表示了叶片的最大光合能力,而 A_{max} 决定于 Rubisco 的活性和电子传递速率, Rubisco 是光合碳同化反应的催化酶,被视为光合作用的限速酶^[32],光合能力 (A_{max}) 与该酶的活性有着良好的正相关^[26]。本实验 T1 条件下 A_{max} 和 AQY 相对较低,是否因为土壤含水量过高,影响了根

系的生长,继而影响了地上部叶片 PSII 电子传递速率及叶肉细胞的 Rubisco 活性,还有待进一步深入研究。

土壤含水量影响植物光合生理生态响应特性^[33—35],是影响植物生长发育的重要因子,也是决定植被地理分布和限制产量的主要因素。植物的生殖生长期往往是对环境最敏感的时期,也是决定植物能否在该环境条件下繁衍后代的关键时期。本实验条件下,穗期芦苇(需水敏感期)在三种土壤含水量处理中均能保持较好的生理代谢能力和生长发育水平,表明穗期芦苇对三峡库区消落带土壤含水量变化具有很强的光合响应能力,对适应水分逆境条件具有较高的可塑性,不仅表现出耐水湿的特点,还表现出耐旱性,芦苇可作为三峡库区消落带植被恢复建设和生态环境保护的禾本科先锋物种。

参考文献:

- [1] Diao C T, Huang J H. A preliminary study on land resources of the water-level-fluctuation zone in the Three-Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1999, **8** (1): 75—80 [刁承泰, 黄京鸿. 三峡水库水位涨落带土地资源的研究. 长江流域资源与环境, 1999, **8** (1): 75—80]
- [2] Feng D L, Liu Y, Zhong Z C. Study of the present situation and countermeasures of water-level-fluctuating zone in Three Gorges Reservoir Region [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, **22** (6): 378—381 [冯大兰, 刘芸, 钟章成. 三峡库区消落带现状与对策研究. 中国农学通报, 2006, **22** (6): 378—381]
- [3] Xie D T, Fan X H, Wei C F. Effects of the riparian zone of the Three-Gorges Reservoir on the water-soil environment of the reservoir area [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science)*, 2007, **29** (1): 39—47 [谢德体, 范小华, 魏朝富. 三峡水库消落区对库区水土环境的影响研究. 西南大学学报(自然科学版), 2007, **29** (1): 39—47]
- [4] Feng D L, Liu Y, Zhong Z C. The ecosystem functions and economical utilizable valuations of Phragmites communities (reed) [J]. *Journal of Southwest Agricultural University Supplementary Issue*, 2005, **22**: 3—5, 14 [冯大兰, 刘芸, 钟章成. 芦苇的生态功能与经济利用价值. 西南农业大学学报增刊, 2005, **22**: 3—5, 14]
- [5] Yin C Q, Lan Z W, Yan W J. Retention of allochthonous nutrients by ecotones of Baiyangdian Lake [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, **6** (1): 76—80 [尹澄清, 兰智文, 晏维金. 白洋淀水陆交错带对陆源营养物质的截留作用初步研究. 应用生态学报, 1995, **6** (1): 76—80]
- [6] C H House, S W Broome, M T Hoover. Treatment of nitrogen and phosphorus by a constructed upland wetland wastewater treatment system [J]. *Wat Sci Tech*, 1994, **29** (4): 177—184
- [7] Wang H Y. Affects of the Three Gorges Reservoir on the water environment of the Xiangxi River with the proposal of countermeasures [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14** (2): 233—237 [王海云. 三峡水库蓄水对香溪河水环境的影响及对策研究. 长江流域资源与环境, 2005, **14** (2): 233—237]
- [8] Cai Q H, Hu Z Y. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30** (1): 7—11 [蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究. 水生生物学报, 2006, **30** (1): 7—11]
- [9] Bragina T V, Martinovich L I, Rodionova N A, et al. Ethylene-induced activation of xylanase in adventitious roots of maize as a response to the stress effect of root submersion [J]. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2001, **37** (6): 618—621
- [10] Hu X S, Wang S J. A review of studies on water stress and drought tolerance in tree species [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, **34** (2): 77—88 [胡新生, 王世绩. 树木水分胁迫生理与耐旱性研究进展及展望. 林业科学, 1998, **34** (2): 77—88]
- [11] Hu Z S, Xu C Q, Fu R S. Physiological response for Castaneda henrys seedling under water stress and the action of 6-BA [J]. *Journal of Fujian Forestry College*, 2000, **20** (3): 1—4 [胡哲森, 许长钦, 傅瑞树. 锥栗幼苗对水分胁迫的生理响应及 6-BA 的作用. 福建林学院学报, 2000, **20** (3): 1—4]
- [12] Demmig-Adams B, Adams W W. Xanthophyll cycle and light stress in nature: uniform response to excess direct sunlight among higher plant species [J]. *Planta*, 1996, **198**: 460—470
- [13] Zhang Z L, Qu W J. Guide book for plant physiology experiments [M]. Beijing: Higher Education Press 2004, 1—3, (the 3rd edition) [张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社. 2004, 1—3, 第三版]
- [14] Chen S H, Jiang J Q, Sun Q. The research of Photosynthetic characters and water content in Osmanthus fragrans Lour leaves [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2006, **3** (3): 417—418 [陈洪国, 姜军权, 孙全. 桂花叶片水分含量及光合生理特性研究. 安徽农业科学, 2006, **3** (3): 417—418]
- [15] Li J Y. Mechanisms of drought tolerance in plants [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1991, **13** (3): 92—96 [李吉跃. 植物耐旱性及其机理. 北京林业大学学报, 1991, **13** (3): 92—96]
- [16] Scholes J D, Press M C, Zipperlen S W. Differences in light energy utilization and dissipation between dipterocarp rainforest tree seedlings [J]. *Oecologia*, 1997, **109**: 41—48
- [17] Lin J K, Lai M Z. Response of net photosynthetic rate to ecological factors in tea leaves [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20** (3): 404—408 [林金科, 赖明志. 茶叶叶片净光合速率对生态因子的响应. 生态学报, 2000, **20** (3): 404—408]
- [18] Zhang S Y, Zhang G C, Chen J, et al. Effect of soil moisture on photosynthesis and transpiration of *Parthenocissus quinquefolia* planch [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, **4** (4): 62—66 [张淑勇, 张光灿, 陈建, 等. 土壤水分对五叶爬山虎光合与蒸腾作用的影响. 中国水土保持科学, 2006, **4** (4): 62—66]

- [19] Colom M R, Vazzana C. Drought stress effects on three cultivars of *Eragrostis curvula*: photosynthesis and water relations [J]. *Plant Growth Regulation*, 2001, **34**: 195—202
- [20] Raendru G, Naidu C V, Mallik Ijuna K. Effect of water stress on photosynthesis and growth in two teak phenotypes [J]. *Photosynthetica*, 1999, **36**(4): 627—630
- [21] Chen H J, Quails R G, Blank R R, *et al*. Effect of soil flooding on photosynthesis, carbohydrate partitioning and nutrient uptake in the invasive exotic *Lepidium latifolium* [J]. *Aquatic Botany*, 2005, **82**: 250—268
- [22] Luo F L, Wang L, Zeng B, *et al*. Photosynthetic responses of the riparian plant *Arundinella anomala* Steud. in Three Gorges Reservoir region as affected by simulated flooding [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(11): 3602—3609 [罗芳丽, 王玲, 曾波, 等. 三峡库区岸生植物野古草光合作用对水淹的响应. 生态学报, 2006, **26**(11): 3602—3609]
- [23] Chi L H, Song F B. Study on light response of photosynthesis in leaves of four plants of Songnen Plain [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2007, **29**(2): 119—122, 138 [迟丽华, 宋凤斌. 松嫩平原 4 种植物光合作用光响应特性的研究. 吉林农业大学学报, 2007, **29**(2): 119—122, 138]
- [24] Wang Z. Plant physiology [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press 2000, 121—180 (the 1st edition) [王忠. 植物生理学. 北京: 中国农业出版社. 2000, 121—180, 第 1 版]
- [25] Larcher W. Plant ecology and physiology [M]. Qu Z X translation, (the 5th edition). Beijing: Chinese Agricultural University Press 1997, 787 [Larcher W. 植物生态生理学. 翟志席译, (第 5 版). 北京: 中国农业大学出版社. 1997, 787]
- [26] Xu D Q. Photosynthesis efficiency [M]. Shanghai: Shanghai Technological Press 2002 [许大全. 光合效率. 上海: 上海科技出版社. 2002]
- [27] Qiu G X. Plant photosynthesis efficiency [M]. Beijing: Science Press 1992 [丘国雄. 植物光合作用效率. 北京: 科学出版社. 1992]
- [28] Yu S W, Tang Z C. Physiology and molecular biology in plant [M] (the 1st edition). Beijing: Science Press 1992, 236—243 [余叔文, 汤章城. 植物生理学与分子生物学. 第 1 版. 北京: 科学出版社. 1992, 236—243]
- [29] Jian H Y, Zou S Q. The photosynthetic characteristics in leaves of carpet grass *Axonopus compressus* [J]. *Guihaia*, 2003, **23**(2): 181—184 [蹇洪英, 邹寿青. 地毯草的光合特性研究. 广西植物, 2003, **23**(2): 181—184]
- [30] Xu D Q. Photosynthesis efficiency [M]. Beijing: Science Press 2001, 13—15 [许大全. 光合作用效率. 北京: 科学出版社. 2001, 13—15]
- [31] Dong Z X, Han Q F, Jia Z K, *et al*. Photosynthesis rate in response to light intensity and CO₂ concentration in different alfalfa varieties [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(6): 2272—2278 [董志新, 韩清芳, 贾志宽, 等. 不同苜蓿品种光合速率对光和 CO₂ 浓度的响应特性. 生态学报, 2007, **27**(6): 2272—2278]
- [32] Bernaeehi C J, sillgBaas E L, Pimentel C, *et al*. Improved temperature response functions for models of Rubisco-limited photosynthesis [J]. *Plant Cell and Environment*, 2001, **24**: 253—259
- [33] Anderson P H, Pezeshki S R. The effects of intermittent flooding on seedlings of three forest species [J]. *Photosynthetica*, 1999, **37**(4): 543—552
- [34] Simone O D, Junk W J, Schmidt W. Central Amazon flood plain forests: Root adaptations to prolonged flooding [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2003, **50**(6): 848—855
- [35] Li C X, Zhong Z C, Liu Y. Effects of soil water change on photosynthetic characteristics of *Taxodium distichum* seedling in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(8): 1953—1958 [李昌晓, 钟章成, 刘芸. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉幼苗光合特性的影响. 生态学报, 2005, **25**(8): 1953—1958]

THE RESEARCH OF PHOTOSYNTHETIC CHARACTERS ON PHRAGMITES COMMUNIS (REED) IN HYDRO-FLUCTUATION BELT OF THREE GORGES RESERVOIR AREA

FENG Da-Lan¹, LIU Yun^{1*}, HUANG Jian-Guo¹, YANG Juan², MA Fei¹ and XIE Jun¹

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), College of Resources and Environment, Southwest China University, Chongqing 400716;

2. College of Agronomy and Biological Science and Technology, Southwest China University, Chongqing 400716)

Abstract: When the Three-Gorges Reservoir was put into use, riparian zones have been formed on both sides of the reservoir where the water level changes periodically. This ecotone of overlapping water aquatic ecosystem and terrestrial ecosystem, owing to its characteristic ecological vulnerability, biodiversity, water periodical fluctuation and high frequency of human activities, has a profound influence on the water aquatic and terrestrial ecosystems. At the same time, the zones will confront rigorous ecological and environmental problems. Therefore, this paper researches upon the reed (*Phragmites communis*) which lives on the both sides of Jialingjiang River. For researching on soil moisture contents of the hydro-fluctuation belt in Three Gorges Reservoir Area and provide the theoretic evidences of restoration and rehabilitation of vegetation and eco-environment protection, three different types of water treatments were applied to the reed (*Phragmites communis*) to determine its photosynthetic eco-physiological characteristics. The treatments T1 (with soil being complete submerged 2cm), T2 (with soil water content being 70 % to 100 % of field capacity) and T3 (with soil water content 40% to 60 % of field capacity) simulated the conditions in the hydro-fluctuation belt. During the experimental process, the reed was irrigated with the water from the Jialingjiang River. The results showed that the water content of leaves, apparent quantum yields (AQY), dark respiration rate (R_d) and light compensation point (LCP) were affected significantly under different soil moisture content conditions, however, there were no significant differences about light saturation point (LSP) and the maximum net photosynthetic rates (A_{max}). The maximum net photosynthetic rates (A_{max}) of the reed (*Phragmites communis*) were clearly different for the three treatments. The T1-plants (i.e. the flooded plants) was $17.63 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, while the T3-plants (i.e. the 'dry-treatment' plants) was $20.97 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$; In addition, the apparent quantum yields (AQY) of the T3-plants was $0.055 \mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol Photons}$, which was higher than that of the T1- and T2-plant significantly, it indicated that T3 had high transitive efficiency of light energy and photosynthetic ability; moreover, the T3-plant had the highest water use efficiency (WUE) and light quantum use efficiency (QUE), but the smallest ratio of free water to bound water, it suggested that the reed (*Phragmites communis*) had high tolerance to drought. The light compensation point of the T2-plant was $35.43 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, which was higher than that of the T1- and T3-plant significantly, and light saturation point (LSP) of the T1-plant, T2 and T3 were 912.5, 803.89 and $897.22 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ respectively, which showed that there was a wider use range of light in group T1. Moreover, C_i of T1 was the highest than that of T2 and T3, but the dark respiration rate was the lowest in group T1, which showed its resource was very plentiful and be consumed rarely. Compared to other plant species, the flooded reed (*Phragmites communis*) had still the maximum net photosynthetic rate ($17.63 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$), which indicated that reed also has a high tolerance to inundation. It was also demonstrated that the reed (*Phragmites communis*) could not only tolerate water submersion and wet condition but also endure drought. Therefore, the reed (*Phragmites communis*) could be a precedent species for restoration and rehabilitation of vegetation and eco-environment protection in the hydro-fluctuation belt of Three Gorges reservoir region.

Key words: Three Gorges Reservoir Area; Hydro-fluctuation belt; *Phragmites communis* (reed); Heading stage; Soil moisture content; Characteristics of photosynthesis